

УДК 524.1-352

## МЕТОД КОЛЬЦА СТАНЦИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: 2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2020 г. М. А. Абунина<sup>1</sup>, А. В. Белов<sup>1</sup>\*, Е. А. Ерошенко<sup>1</sup>\*\*, А. А. Абунин<sup>1,2</sup>, В. А. Оленева<sup>1</sup>, В. Г. Янке<sup>1</sup>, А. А. Мелкумян<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия

<sup>3</sup>Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

\*e-mail: abelov@izmiran.ru

\*\*e-mail: erosh@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

После доработки 14.06.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

С помощью метода кольца станций можно выделять и исследовать специфические угловые распределения вариаций космических лучей, которые плохо описываются суммой первых сферических гармоник. Приводятся примеры использования метода кольца станций и их подробное описание. Показано применение метода для исследования предвестников Форбуш-эффектов и особенностей поведения космических лучей внутри возмущений солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0016794020020029

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метод кольца станций – это простой и полезный инструмент для изучения вариаций космических лучей (КЛ), в частности, во время Форбуш-эффектов (ФЭ) и для определения предвестников межпланетных возмущений. Возможность использования непосредственных данных отдельных детекторов, без сложной обработки, независимо от конкретных моделей является главным достоинством этого метода. В первой части этой работы [Абунина и др., 2020] подробно описаны характеристики и особенности метода кольца станций. А в данной работе приводятся примеры использования метода для различных задач.

Чаще всего метод кольца станций используется при изучении Форбуш-эффектов. Существуют два основных типа возмущений межпланетной среды: рекуррентные и спорадические [Lockwood, 1971; Dorman, 1974; Shah et al., 1981; Cane, 2000; Belov, 2009; Абунин и др., 2012; Mavromichalaki et al., 2013; Belov et al., 2014; Kiyakunova et al., 2015]. К первому типу относятся возвращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр. Ко второму – корональные выбросы, которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные

облака (см., напр., [Bothmer and Zhukov, 2007; Gopalswamy, 2009]). Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик как в магнитосфере Земли, так и в вариациях КЛ. Но высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр, как правило, вызывают менее интенсивные геомагнитные бури и меньшие по величине Форбуш-эффекты, чем корональные выбросы.

Цель данной работы привести конкретные примеры использования метода кольца станций, описанного в работе [Абунина и др., 2020]. Далее будут рассмотрены события, источниками которых являются корональные выбросы, поскольку они достаточно часто сопровождаются ударной волной и можно точно оценить время прихода возмущения к Земле.

### 2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

#### 2.1. Предвестники Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений

Перед геомагнитными бурями, если они обусловлены корональными выбросами, в галактических космических лучах (ГКЛ) часто наблюдаются предвестники возмущения – предвышение или предпонижение плотности КЛ в определен-

ных областях долгот до прихода к Земле ударной волны [Nagashima et al., 1990, 1994; Belov et al., 1995]. Увеличение амплитуды первой гармоники анизотропии космических лучей в такие периоды по данным сети нейтронных мониторов (НМ), как правило, связано именно с появлением предвестника [Parailiou et al., 2013].

Изучение аномалий (предпонижений и предповышений) в интенсивности КЛ, обычно предшествующих Форбуш-эффектам, является главным предметом многих исследований (см., напр., [Leergunnavarat et al., 2003; Dorman, 2005; Kudela and Storini, 2006]). Предпонижения, по-видимому, можно объяснить эффектом “конуса потерь”, в котором Земля оказывается магнитно связанной с обедненной КЛ областью за фронтом ударной волны, и часть КЛ из области пониженной плотности может выйти из зоны ФЭ вдоль магнитных силовых линий [Belov et al., 1995; Leergunnavarat et al., 2003]. В то время как предповышения вызваны ускорением галактических КЛ на фронте приближающихся межпланетных возмущений в результате отражения частиц от ударной волны [Дорман и др., 1972; Каминер и др., 1981; Belov et al., 1995; Kudela and Storini, 2006]. Оба типа предвестников создаются одновременно в области перед ударной волной. Наблюдаемый эффект зависит от формы и свойств (прежде всего, от скорости) межпланетной ударной волны и от взаимного расположения ударной волны и точки наблюдения. В реальных событиях можно видеть либо один из этих предвестников, либо ни одного, либо оба. Последний случай наиболее интересен, в нем создаются наиболее сложные и необычные угловые распределения интенсивности КЛ.

В недавних исследованиях [Parailiou et al., 2012a, 2012b] отмечается, что увеличение экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ ( $A_{xy}$ ), наблюдаемое, по крайней мере, за час до прибытия ударной волны, может рассматриваться как часть предвестников больших Форбуш-эффектов и геомагнитных бурь.

Чаще всего предвестники наблюдаются в событиях, источники которых располагаются в западной зоне видимого солнечного диска (см., напр., [Parailiou et al., 2013]). Но иногда они регистрируются и для ФЭ с восточными и центральными солнечными источниками. Далее на многих рисунках показаны долготно-временные распределения вариаций КЛ. По вертикальной оси — асимптотическая долгота для станций космических лучей, на горизонтальной оси показана временная шкала в формате день.час (DD.НН). Понижение интенсивности потока КЛ показаны черными кружками, увеличение интенсивности космических лучей показано серыми кружками относительно спокойного базового периода. Раз-

мер кружка пропорционален величине вариаций. Вертикальной линией отмечено начало события. Каждая наклонная прямая из кружков соответствует вариациям КЛ одного НМ за одни сутки.

### *Событие 10 марта 2011 г.*

Примером Форбуш-эффекта, источником которого является солнечная вспышка в западной части диска, может служить событие 10 марта 2011 г. Это событие началось в 06:45 UT, когда на Земле было зарегистрировано SSC. Источником являлась вспышка M3.7 (в активной области № 11164, с координатами N24W46), которая произошла 07.03.2011 г. в 19:43 UT. Максимальная величина межпланетного магнитного поля в возмущении составляла 11.9 нТл, максимальная скорость солнечного ветра была 405 км/с, понижение интенсивности космических лучей составило ~2.5%, а максимум анизотропии составил 3%. Данное событие сопровождалось малой магнитной бурей ( $Kp$ -индекс был равен 5+, а  $Dst$ -индекс составил -83 нТл).

На рисунке 1 в начале диаграммы, 8 марта, наблюдаются суточные изменения в вариации КЛ, далее за 6—8 ч до регистрации SSC видно предвозрастание интенсивности КЛ (увеличение размера кружков) на асимптотических долготах  $170^{\circ}$ — $310^{\circ}$ , продолжающееся 8—10 ч после начала возмущения. Кроме того, за 3—4 ч на нескольких станциях зарегистрировано предпонижение в области  $130^{\circ}$ — $180^{\circ}$ . Отметим, что Форбуш-эффект начинался неравномерно, на некоторых НМ только через 10—12 ч.

В ряде исследований (напр., [Belov et al., 2001]) отмечалось, что во время предвестников появляется специфичное угловое распределение интенсивности ГКЛ, при котором максимум и минимум находятся очень близко друг к другу по долготе, и в этот момент интенсивность КЛ меняется очень сильно в определенных долготах. На рисунке 2 приведен пример такого углового распределения вариаций КЛ для события 10 марта 2011 г. в 02:00 UT — за четыре с половиной часа до регистрации ударной волны.

На рисунке 2 разброс вариаций составляет более 2.2% с очень узким минимумом в области  $90^{\circ}$ — $115^{\circ}$ . Четко проявляется близкое положение минимальной и максимальной вариаций космических лучей в узкой полосе долгот ( $\sim 90^{\circ}$ ). Также из рис. 2 видно, что кривая первой гармоники не подходит для описания наблюдаемой долготной зависимости. Все эти особенности можно рассматривать в качестве предвестников приближающихся межпланетных возмущений.

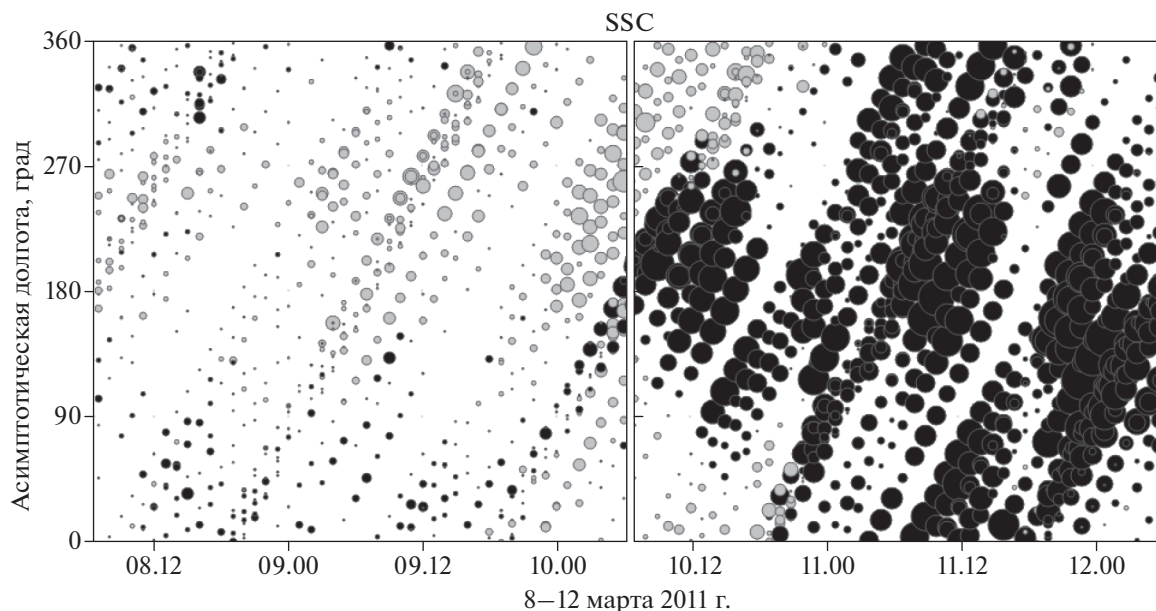


Рис. 1. Пример предвестника Форбуш-эффекта с западным солнечным источником 10 марта 2011 г.

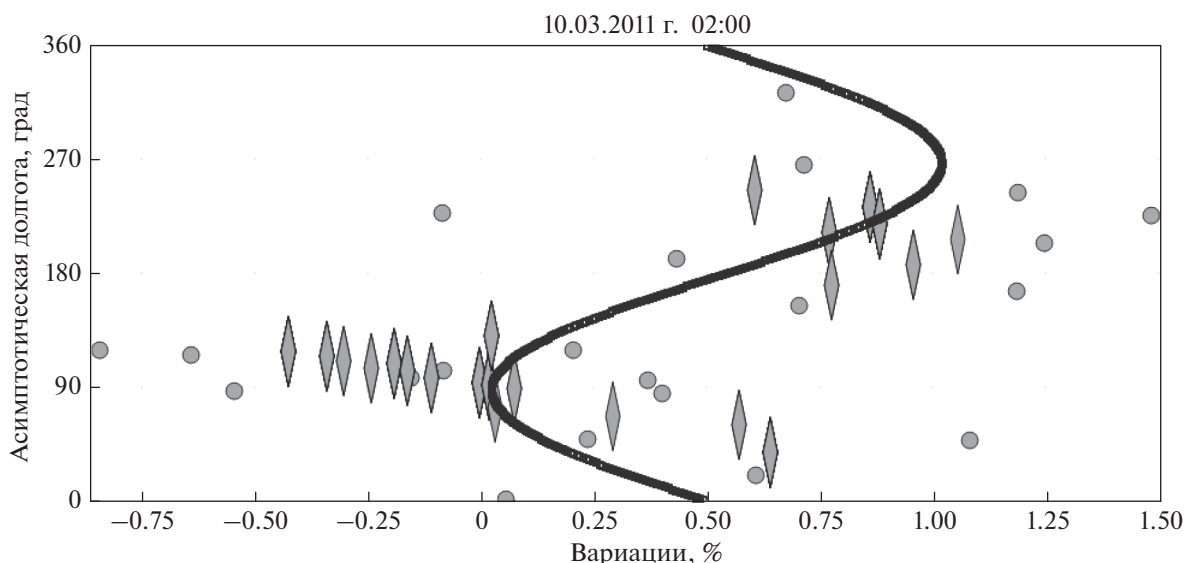


Рис. 2. Распределение вариаций космических лучей по асимптотической долготе нейтронных мониторов для события 10 марта 2011 г. в 02:00 UT: точки – часовые вариации интенсивности космических лучей, ромбы – вариации интенсивности космических лучей, усредненные по секторам  $\pm 20^\circ$ . Кривая – первая гармоника анизотропии космических лучей (солнечно-суточная вариация).

*Событие 17 марта 2013 г.*

Другим показательным примером возмущения, но уже от центрального сектора, является возмущение 17 марта 2013 г., где в 05:59 UT у Земли была зарегистрирована ударная волна. Данное возмущение связано со вспышкой M1.1 (координаты N07E07), произошедшей 15 марта в 05:46 UT. Максимальная величина межпланетного магнитного поля в возмущении составляла 17.8 нТл, максимальная скорость солнечного ветра была

725 км/с, уменьшение интенсивности космических лучей составило  $\sim 8.6\%$ , максимум анизотропии был равен 4.6%. В результате была зарегистрирована большая магнитная буря с Kp-индексом, равным 7-, и Dst-индексом равным -132 нТл.

В этом событии (рис. 3) за 12–14 ч до регистрации SSC началось предпонижение интенсивности КЛ на долготах  $50^\circ$ – $150^\circ$ . В действительности предпонижение, видимо, началось на сутки раньше и почти совпало по фазе с суточной волной, усилив ее.

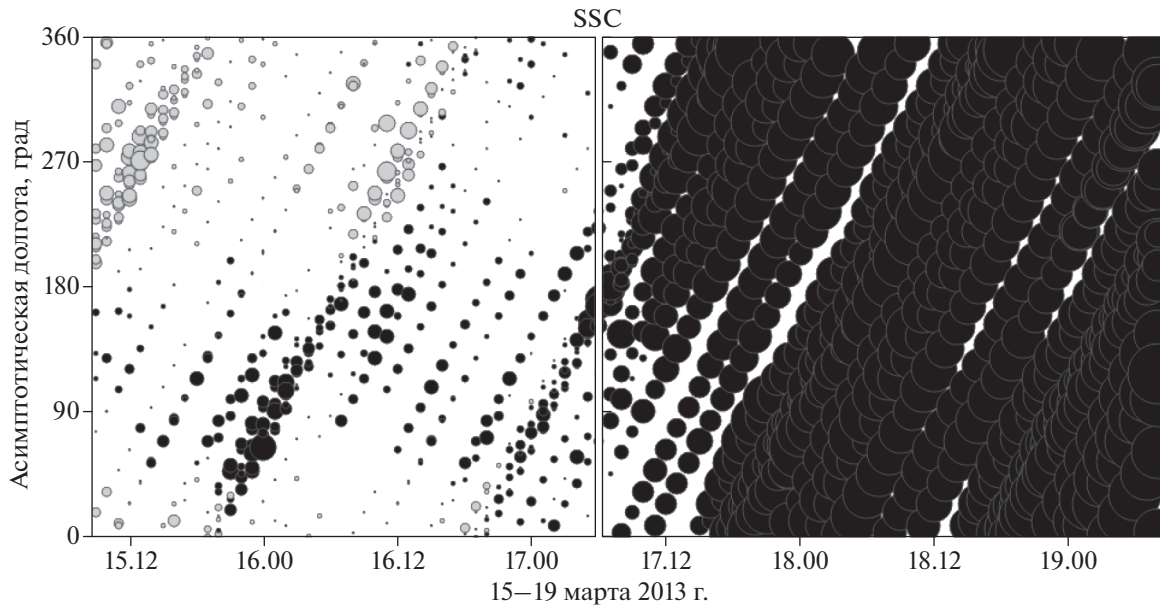


Рис. 3. Пример предвестника Форбуш-эффекта с центральным солнечным источником 17 марта 2013 г.

#### Событие 23 июня 2013 г.

Ярким примером события от восточного солнечного источника является возмущение 23 июня 2013 г., в котором в 04:26 UT было зарегистрировано SSC. Это возмущение связано со вспышкой  $M2.9$ , которая произошла 21 июня в 02:30 UT в активной области № 11777 (с координатами S16E73). Максимальная величина межпланетного магнитного поля в возмущении составляла 7.6 нТл, максимальная скорость солнечного ветра была 697 км/с, уменьшение интенсивности космических лучей составило  $\sim 5.9\%$ , а максимум анизотропии составил 1.7%. Данное событие сопровождалось небольшим усилением геомагнитной активности ( $Kp$ -индекс был равен 4+, а  $Dst$ -индекс составил  $-49$  нТл).

На рисунке 4 в конце 21 – начале 22 июня вариации КЛ показывают распределение, соответствующее спокойному состоянию межпланетной среды. Предвозрастание практически на всех станциях началось за 10–12 ч до начала события (рис. 4) и продолжалось после регистрации SSC еще 2–8 ч.

#### Событие 24 августа 2013 г.

Выше приводились примеры предвестников для ФЭ, которые начинались с прихода ударной волны. Но иногда можно наблюдать предвестники и для Форбуш-эффектов, для которых ударная волна не была зарегистрирована. Примером такого события является ФЭ 24 августа 2013 г. (рис. 5), когда за 4 ч до его начала на долготах  $140^\circ$ – $160^\circ$  наблюдалось предпонижение интенсивности КЛ.

На рисунке 5 вертикальной чертой отмечено начало ФЭ. Конечно, при отсутствии ударной волны точное время начала ФЭ определить достаточно трудно и при этом нельзя обойтись без субъективизма. Однако мы учитываем многие факторы (изменение параметров солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей) и считаем, что определяем начало достаточно верно (с точностью 1–2 ч). На рис. 6 приведены данные солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей для 23–26 августа 2013 г. Видно, что в начале 24 августа началось резкое снижение плотности КЛ одновременно с небольшим, но резким увеличением скорости солнечного ветра и напряженности ММП и значительный рост экваториальной составляющей анизотропии КЛ. Учитывая все изменения, мы обозначили начало ФЭ 24 августа в 00 UT.

Отметим, что в данном событии не наблюдались значительные геомагнитные возмущения, но величина Форбуш-эффекта составила 3%. Плотность КЛ (рис. 6, средняя панель, верхняя кривая) рассчитана методом глобальной съемки для частиц с жесткостью 10 ГВ [Белов и др., 2018].

Необычное угловое распределение интенсивности КЛ, подобное показанному в событии 10 марта 2013 г. (рис. 2), может длиться достаточно долго. На рисунке 7 приведен пример похожего распределения для события 23 августа 2013 г. Здесь объединены вариации для трех последовательных часов, начиная с 20:00 UT (за четыре часа до начала ФЭ).

Из рисунка 7 видно, что на большинстве станций наблюдаются положительные вариации, пре-

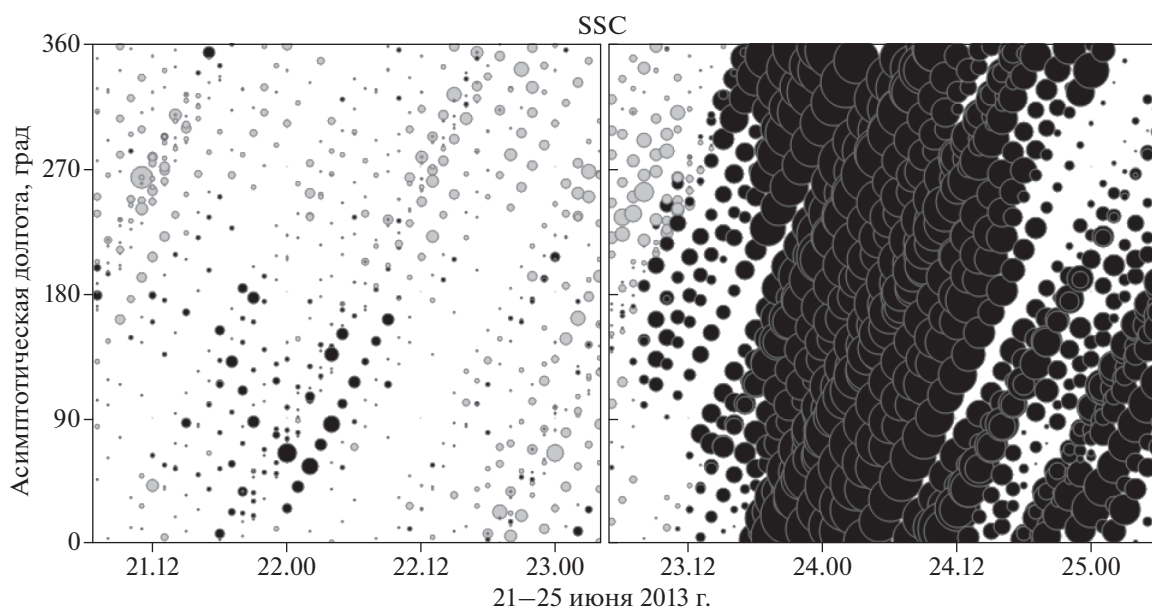


Рис. 4. Пример предвестника Форбуш-эффекта с восточным солнечным источником 23 июня 2013 г.

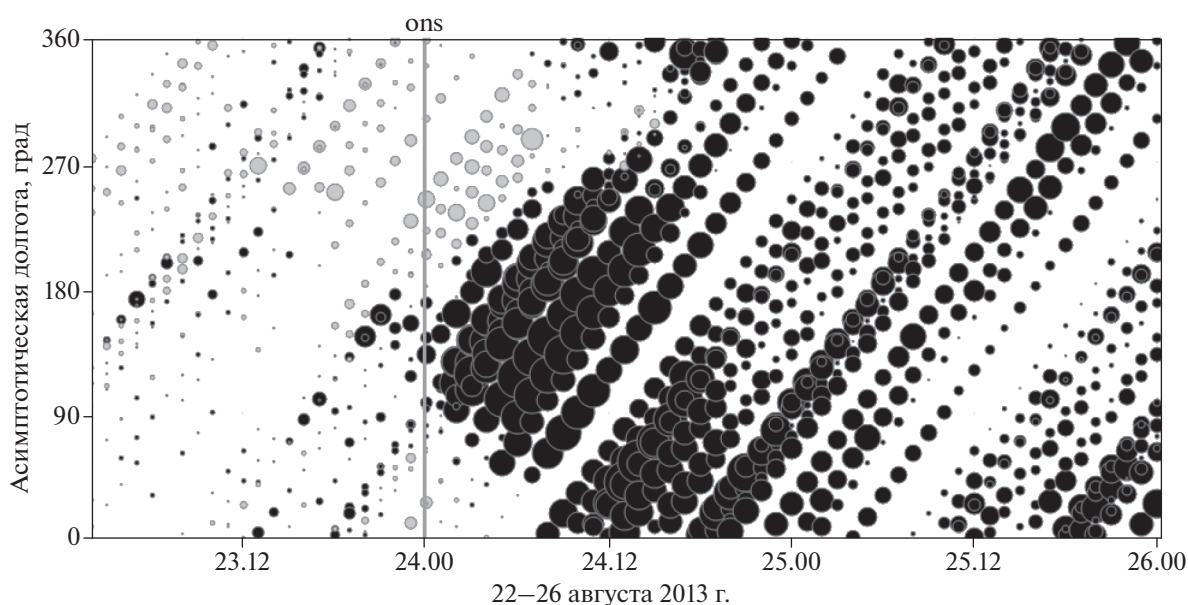


Рис. 5. Пример предвестника Форбуш-эффекта без ударной волны 24 августа 2013 г.

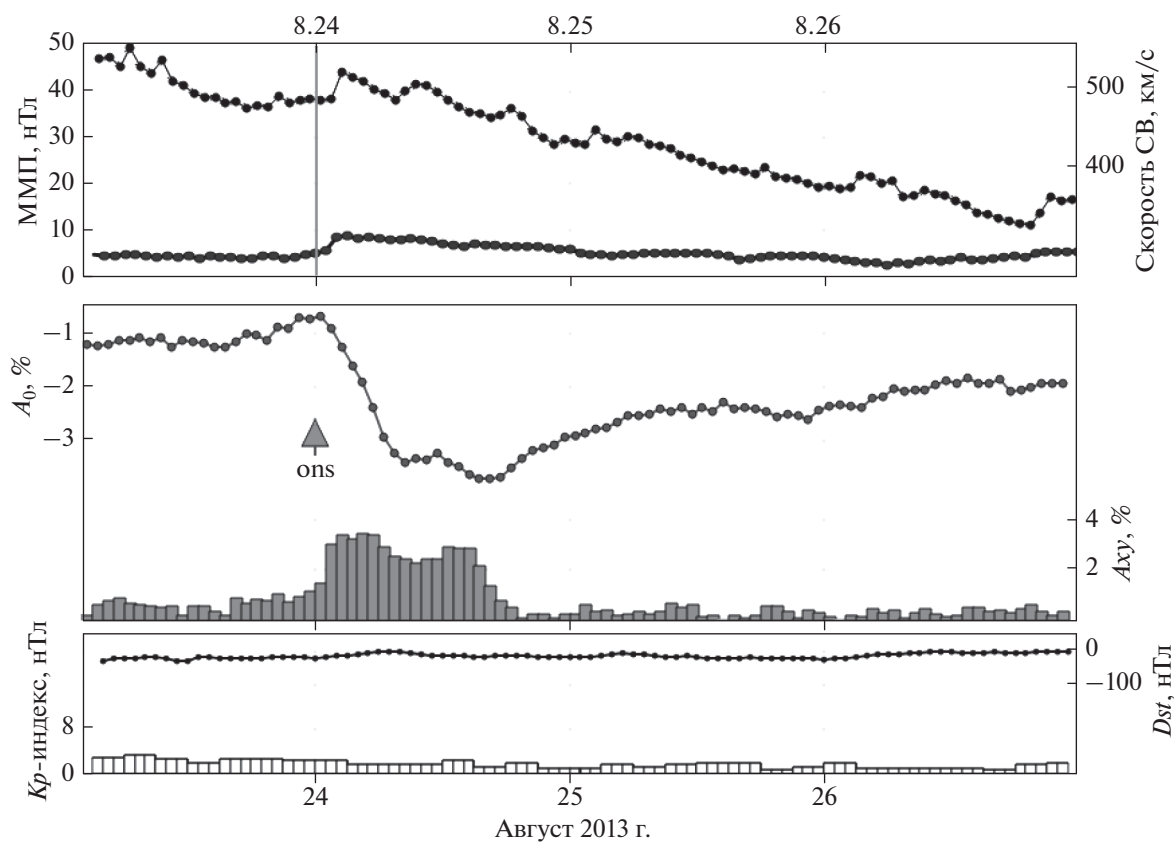
вышающее 1%, за исключением узкого сектора на долготах  $110^{\circ}$ – $140^{\circ}$ , где наблюдалось предпонижение интенсивности КЛ.

### 2.2. Особенности поведения вариаций КЛ во время Форбуш-эффектов

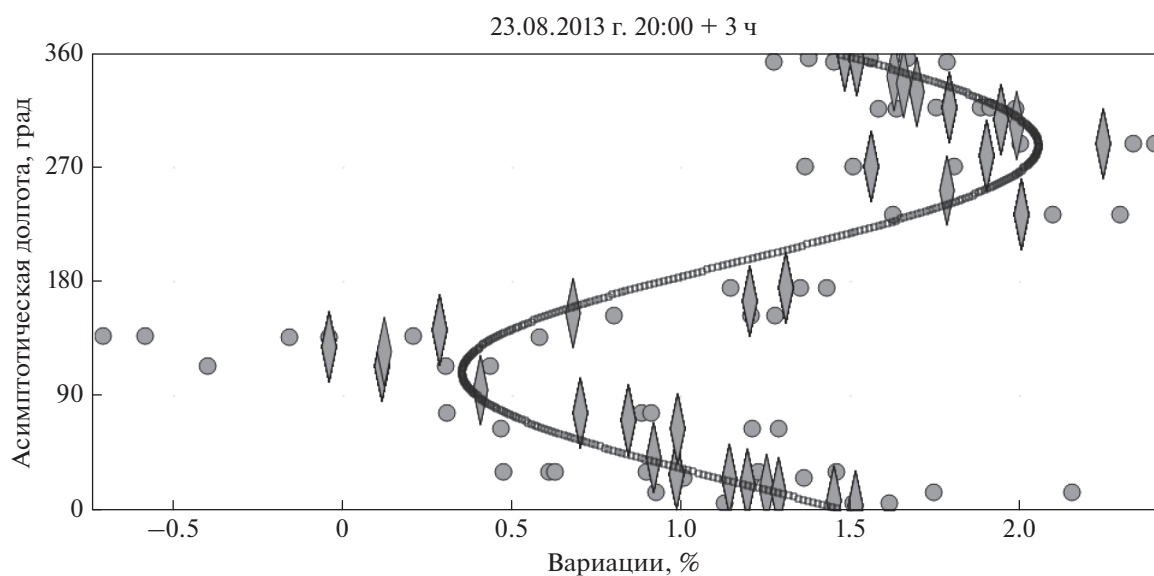
Метод кольца станций также применим для исследования вариаций КЛ во время Форбуш-эффектов. Рассмотрим его использование в этом аспекте.

### Событие 25 августа 2018 г.

25 августа 2018 г. зарегистрировано интересное событие. В начале диаграммы (рис. 8) зарегистрированы вариации КЛ, соответствующие спокойной межпланетной обстановке. После начала события понижение интенсивности космических лучей показывают не все станции НМ, а 25–26 августа на долготах  $100^{\circ}$ – $270^{\circ}$  наблюдается значительное увеличение интенсивности КЛ выше фонового значения на 2–3%, что хорошо видно на рис. 8.



**Рис. 6.** Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности 23–26 августа 2013 г. На верхней панели показаны изменения скорости солнечного ветра (верхняя кривая) и напряженности ММП (нижняя кривая); на средней панели – поведение плотности ( $A_0$ ) и экваториальной составляющей векторной анизотропии ( $A_{xy}$ ) КЛ; на нижней – индексы геомагнитной активности ( $K_p$  и  $D_{st}$ ).



**Рис. 7.** Распределение вариаций космических лучей по асимптотической долготе нейтронных мониторов для события 24 августа 2013 г. в течение трех часов с 20:00 УТ 23.08.2013 г.: точки – часовые вариации интенсивности космических лучей, ромбы – вариации интенсивности космических лучей, усредненные по секторам  $\pm 20^\circ$ . Кривая – первая гармоника анизотропии космических лучей (солнечно-суточная вариация).

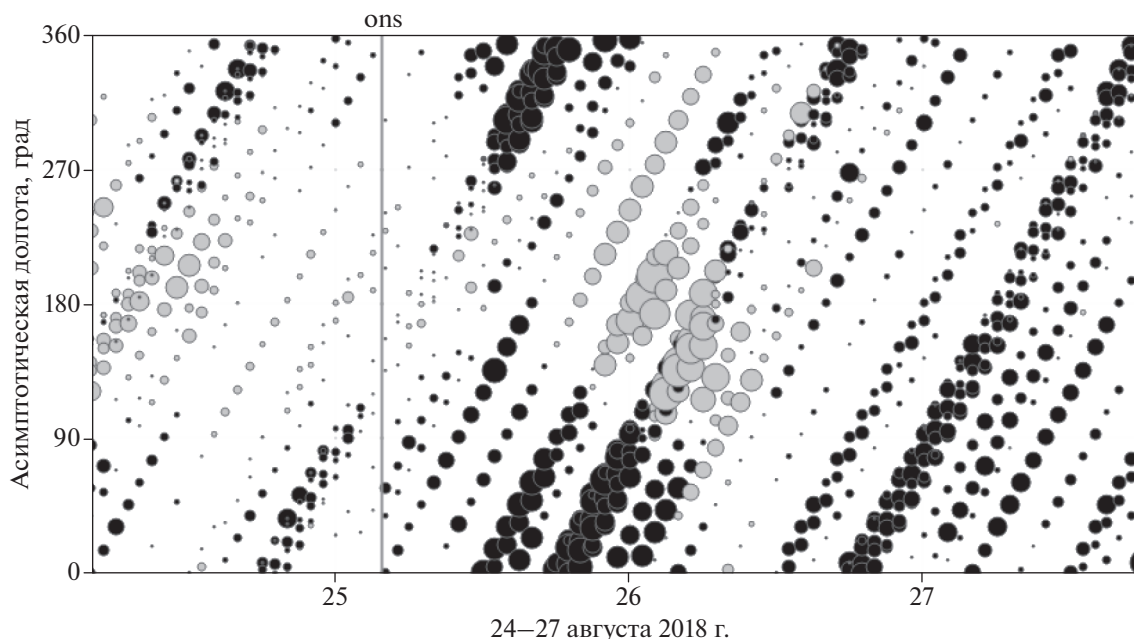


Рис. 8. Изменение интенсивности КЛ 24–27 августа 2018 г.

Во время этого события наблюдалось небольшое понижение плотности КЛ ( $\approx 1.5\%$ ), но сравнительно большие значения составляющих векторной анизотропии КЛ (экваториальная составляющая  $A_{xy} = 2.9\%$ ; северо-южная составляющая  $A_z = 2.35\%$ ) и большая магнитная буря ( $K_p = 7+$ ,  $Dst = -174$  нТл).

Показанное на рис. 8 поведение КЛ во время ФЭ является нетипичным, и эту редкую особенность наиболее наглядно выявляет метод кольца станций.

#### *Анизотропное начало Форбуш-эффектов*

Довольно часто ФЭ начинаются не одновременно на всех станциях, что связано с постепенным попаданием Земли в обедненную космическими лучами область. При построении долго-временно-временных диаграмм методом кольца станций, такие Форбуш-эффекты имеют анизотропное начало, что ярко демонстрируют рисунки 1, 4, 5.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод кольца станций служит одним из главных способов качественного выявления специфических изменений распределения вариаций КЛ, возникающих при приближении больших межпланетных возмущений к Земле. Он позволяет изучать сложное поведение анизотропии внутри возмущений солнечного ветра и выделять необычные угловые распределения вариаций КЛ,

которые невозможно описать суммой первых сферических гармоник.

Метод кольца станций используется для изучения вариаций космических лучей во время Форбуш-эффектов и для обнаружения предвестников межпланетных возмущений и ФЭ, что было неоднократно доказано на практике.

На наш взгляд, метод кольца станций имеет значительный потенциал для развития и будет активно использоваться в будущем.

### 4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: ([http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our\\_Acknowledgment.pdf](http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf)); благодарим базу данных NMDB ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 3, гранта РФФИ № 17-02-00508 и гранта РФФИ № 15-12-20001.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным

- и постепенным началом // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 1. Общее описание // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 1. С. 41–48. 2020.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунин А.А., Абунина М.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018.
- Дорман Л., Каминер Н., Кузьмичева А. Временные и пространственные изменения возрастных интенсивности космических лучей перед Форбуш-понижениями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 5. С. 814–822. 1972.
- Каминер Н.С., Кузьмичева А.Е., Мырина Н.В. Энергетический спектр эффекта возрастания космических лучей перед Форбуш-понижением // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. № 2. С. 358–359. 1981.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Iucci N., Villorisi G., Yanke V.G. Search for Predictors of Forbush Decreases / Proc. 24th ICRC, Rome, Italy, 1995. V. 4. P. 888–891. 1995.
- Belov A.V., Bieber J.W., Eroshenko E.A., Evenson P., Pyle R., Yanke V.G. Pitch-Angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: neutron monitor observations / Proc. 27th ICRC. Hamburg, Germany, 2001. P. 3507–3510. 2001.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symp. V. 257. P. 439–450. 2009.
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Gopalswamy N., Yashiro S. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases // Solar Phys. V. 289. P. 3949–3960. 2014.
- Bothmer V., Zhukov A. The Sun as the prime source of space weather / Space Weather – Physics and Effects. Ed. V. Bothmer and I.A. Daglis. Springer. P. 31–102. 2007.
- Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. V. 93. P. 55–77. 2000.
- Dorman L.I. Cosmic rays: variations and space explorations. Amsterdam: North-Holland. 1974. 675 p.
- Dorman L.I. Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data // Ann. Geophys. V. 23. I. 9. P. 2997–3002. 2005.
- Gopalswamy N. Coronal mass ejections and space weather. Climate and Weather of the Sun-Earth system (CAWSES): selected papers from the 2007 Kyoto Symposium. Ed. T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M.A. Geller: TERRAPUB, Tokyo. P. 77–120. 2009.
- Kryakunova O., Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Malimbayev A., Tsepakina I., Yanke V. Recurrent and sporadic Forbush-effects in deep solar minimum // J. Phys.: Conf. Ser. V. 632. 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/632/1/012062>
- Kudela K., Storini M. Possible tools for space weather issues from cosmic ray continuous records // Adv. Space Res. V. 37. I. 8. P. 1443–1449. 2006.
- Leerunnavarat K., Ruffolo D., Bieber J.W. Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects // Astrophys. J. V. 593. P. 587–596. 2003.
- Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Revs. V. 12. P. 658–715. 1971.
- Mavromichalaki H., Papaioannou A., Gerontidou M., Papailiou M., Plainaki C., Belov A., Eroshenko E., Abunin A., Abunina M., Yanke V. Cosmic ray events in the beginning of 2012 // J. Phys.: Conf. Ser. V. 409. 2013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012206>
- Nagashima K., Sakakibara S., Fujimoto K., Tatsuoka R., Morishita I. Localized pits and peaks in Forbush decrease, associated with stratified structure of disturbed and undisturbed magnetic fields // Nuovo Cimento C. V. 13C. P. 551–587. 1990.
- Nagashima K., Fujimoto K., Morishita I. Interplanetary magnetic field collimated cosmic ray flow across magnetic shock from inside of Forbush decrease, observed as local-time-dependent precursory decrease on the ground // J. Geophys. Res. V. 99. № A11. P. 21419–21427. 1994.
- Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Precursor effects in different cases of Forbush decreases // Solar Phys. V. 276. I. 1–2. P. 337–350. 2012a.
- Papailiou M., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. The asymptotic longitudinal cosmic ray intensity distribution as a precursor of Forbush decreases // Solar Phys. V. 280. I. 2. P. 641–650. 2012b.
- Papailiou M., Mavromichalaki H., Abunina M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Kryakunova O. Forbush decreases associated with western solar sources and geomagnetic storms: a study on precursors // Solar Phys. V. 283. I. 2. P. 557–563. 2013.
- Shah G., Kaul C., Razdan H., Kaul S. Causes of Forbush decreases / Proc. 17th ICRC. Paris, France, 1981. V. 4. P. 21–24. 1981.